

基于改进遗传算法的乡村综合能源系统优化设计研究

田崇翼¹, 吴俊龙¹, 严毅¹, 石群²

(1. 山东建筑大学 信息与电气工程学院, 济南 250101;

2. 济南英华自动化技术有限公司, 济南 250101)

摘要: 在当前全球能源转型以及“双碳”背景下, 乡村传统功能模式的高成本、高污染弊端日益明显; 针对某些乡村地区目前存在的供能灵活性差、清洁度低等问题, 结合乡村风、光资源更充分的优势, 构建了一种含氢储能结构的新型综合能源系统及基于改进的 C-NSGA-II 算法的容量配置与运行优化的设计方法, 并设置“日均成本节约率”“CO₂ 减排率”以及“效率提升率”评价指标; 实验表明所提出系统相比于乡村传统的能源分供系统, 夏季典型日的 3 种指标结果为: 21.75%、91.03%、97.24%; 冬季典型日的结果为 42.97%、67.31%、55.54%, 显著提升供能系统的经济性、低碳性、节能性, 对未来乡村能源结构转型具有一定的指导意义。

关键词: 综合能源系统; C-NSGA-II; 效率; 氢储能

Research on Optimal Design of Rural Integrated Energy System with Hydrogen Storage Structure Based on Improved Genetic Algorithm

TIAN Chongyi¹, WU Junlong¹, YAN Yi¹, SHI Qun²

(1. School of Information and Electrical Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

2. Jinan Yinghua Automation Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Under the backgrounds of global energy transformation and “dual carbon”, the disadvantages of high cost and high pollution are becoming increasingly obvious in traditional rural models; Aiming at the problems of poor energy supply flexibility and low cleanliness in certain rural areas, this paper presents a new integrated energy system (IES) with hydrogen energy storage structure and a design method of capacity allocation and operation optimization based on the improved C-NSGA-II algorithm in combination with the advantages of more abundant wind and light resources in rural areas. Set up evaluation indicators, such as the exergetic efficiency improvement rate, average daily cost saving rate, CO₂ emission reduction rate, and exergetic efficiency improvement rate. Experimental results show that compared with traditional energy distribution systems in rural areas, the proposed system has three indexes on typical summer days of 21.75%, 91.03% and 97.24% and those on typical winter days of 42.97%, 67.31% and 55.54%, which significantly improves the economy, low carbon and energy saving of the energy supply system, and has a certain guiding significance for the future rural energy structure transformation.

Keywords: integrated energy systems; C-NSGA-II; exergetic efficiency; hydrogen energy storage

0 引言

当前时代, 全球都在寻求充分清洁能源实现能源转型, 建筑能耗占全球能耗的 30% 以上, 而能源行业的碳排放量更是占据全社会总碳排放量的 80%^[1], 因此研究新的建筑供能系统以及其运行设计方法显得尤为重要。在此背景下, 多能互补的综合能源系统 (IES, integrated energy system) 逐渐成为国内外研究热点。当前世界对于综合能源的研究, 英国、德国、美国较早开始并成为目前综合能源研究水平领先的国家。在亚洲地区, 中国和日本较早开始相关研究, 但我国更局限于理论研究, 仍然相对缺乏大规模应用案例。

在我国某些乡村地区, 风、光、生物质等可再生能源充足且能源结构改革需求迫切, 开展 IES 的研究与应用已

经成为必要的课题。文献 [2] 针对大规模风力发电带来的消纳问题, 基于风电随机特性设计了多种并网模型, 研究了调峰优化解决方案。文献 [3] 针对电-气耦合 IES 提出了一种基于碳排放流理论的碳排放监测模型及方法。为解决含高比例可再生能源 IES 的消纳问题和满足供能灵活性需求, 文献 [4] 基于 IES 灵活性约束, 结合氢燃料电池提出了一种协调优化调度方法。文献 [5] 结合多任务学习、单任务学习以及长短期记忆网络实现了高预测精度的 IES 多源负荷预测。文献 [6] 基于建筑之间的绝热性能差异导致的热需求响应能力差异构建了围护结构热动态过程模型, 进而提出了针对供热价格方案的双层优化模型。文献 [7] 考虑用户柔性负荷时序特性, 提出了一种可以显著降低用

收稿日期: 2023-11-06; 修回日期: 2023-12-08。

作者简介: 田崇翼 (1986-), 男, 博士, 副教授。

通讯作者: 严毅 (1987-), 男, 博士, 讲师。

引用格式: 田崇翼, 吴俊龙, 严毅. 基于改进遗传算法的乡村综合能源系统优化设计研究[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(12): 208-215.

电经济成本与碳排放量的协同优化方法。文献 [8] 考虑当前快速增加的氢能源汽车, 考虑运营商与氢能源汽车之间包含政府补贴的主从博弈, 提出了一种多区域综合能源优化调度方法。文献 [9] 基于碳捕集和可再生能源发电 (P2G, power to gas) 技术, 提出了一种考虑运营商利润和最大化协调用户成本的双层优化方法。文献 [10] 提出了一种多种群变异、交叉概率自适应变化的改进型遗传算法, 并搭建了风、光并网系统的优化调度模型, 提高了优化的鲁棒性。文献 [11] 基于多场景置信间隙决策理论, 使用改进 Shapley 值法构建阶梯碳交易模型, 进而实现低碳且有高抗风险能力的农业 IES 调度。

文献 [12-16] 分别基于多种方法展开了利用氢能的 IES 协同规划与运行优化方法。文献 [12] 基于改进的麻雀搜索算法, 结合氢燃料电池与氢储能结构, 构建了一种考虑综合需求响应和源-荷协同优化的 IES 优化方法。文献 [13] 提出一种基于风-氢-甲醇-碳捕集一体化的 IES 优化模型, 实现新型氢-甲醇-氢的储氢模式, 增加了 IES 的经济、环保性能。文献 [14] 考虑农业产业园区的丰富生物质资源以及柔性负荷特点, 提出了一种基于设备投资与用能成本约束的规划方法。文献 [15] 考虑氢储能的热电耦合约束问题, 提出了一种基于光热集热单元的氢储能 IES, 提高了氢储能结构的灵活性。文献 [16] 构建了一种氢气-天然气混输情景下的动态最优能流模型, 实现了考虑掺氢环节气网动态模型的 IES 能流优化。这些研究对氢储能、氢-甲醇-氢储能、掺氢气网等多种场景进行了研究, 对促进能源结构的氢能源利用有重要意义。

文献 [17] 针对中国某些乡村地区拥有丰富的可再生能源资源, 却长期采用能源利用率低下且污染严重的供能方式的尖锐问题, 充分利用乡村大量的生物质能, 同时引入分布式光伏组建 IES, 基于改进的鲸鱼优化算法进行了系统规划设计。文献 [18] 结合可再生能源与传统化石燃料, 提出一种 IES 区域能源规划框架, 并在优化模型中引入 11 个评价指标, 使得模型具有极强的准确性, 深度贴合负荷实际需求。文献 [19] 重点考虑不同乡村之间能源转型需求相同, 但实际发展与资源禀赋水平存在差距的问题, 提出了一种兼顾系统经济与效率的多区域农村混合可再生能源系统 (RHRESs, rural hybrid renewable energy systems) 两阶段模型。文献 [20] 结合潮流计算方法, 综合考虑 IES 源-网-荷之间的复杂耦合关系提出了一种以太阳能发电为主要清洁能源供能的 IES 优化设计方法。文献 [21] 引入氢储能结构, 提出一种改进的粒子群优化算法, 实现了新型 IES 的容量配置以及混合操作策略优化方法。文献 [22] 利用能源集线器 (EH, energy hub) 建模方法对提出的 IES 系统进行了矩阵化能量耦合关系分析, 并提出了能质系数 (EQC, energy quality coefficient) 概念, 引入火用效率代替传统的节能性评价指标对 IES 进行了优化设计。分别利用改进的鲸鱼算法、两阶段优化模型、能源集线器建模等方法对 IES 耦合关系进行分析并提高了优化性能。

目前, 兼顾含高比例可再生能源的乡村 IES 的风光消

纳问题以及能源品质变化问题的研究仍然缺乏。本文引入 P2G 技术, 并采用电解水制氢技术、储氢与储热装置构建了一种新型乡村 IES, 并利用一种基于 C-NSGA-II 多目标智能算法的容量配置与运行优化方法, 实验结果显示本文所提出系统极大程度提高了乡村供能系统的经济、低碳和节能性能。

1 系统结构及原理

1.1 IES 系统结构

本文基于 P2G 技术以及电解水制氢技术, 采用高温质子交换膜燃料电池 (HT-PEMFC, high temperature proton exchange membrane fuel cell)、光伏发电机组、风力发电机、电解槽、储氢系统、电制冷机、吸收式制冷机、燃气锅炉、燃气发电机组和储热设备搭建了一种面向乡村的新型 IES, 其结构如图 1 所示。

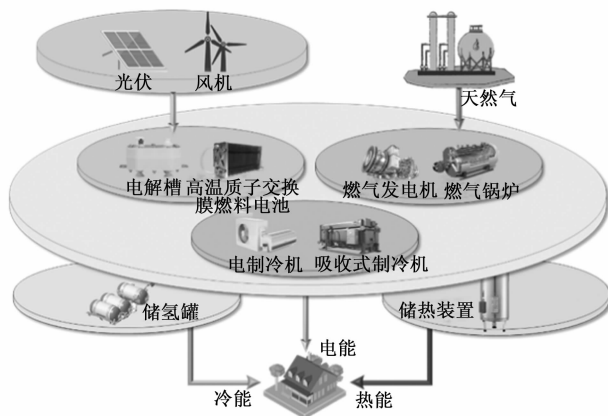


图 1 新型 IES 结构图

由图 1 可知, 在供能侧, 系统由风力发电机和光伏发电机组形成高比例可再生能源发电部分, 另外供能侧与天然气网接通, 当系统供能不足时用于提供天然气作为辅助能源; 在设备侧, 电解槽、HT-PEMFC 和储氢罐组成氢储能系统, 储热罐用于储存多余的热量或者辅助供热, 燃气发电机、燃气锅炉用于负荷不足时作为辅助供能设备进行补充供电或者供热; 电制冷机根据电制冷比进行供冷, 剩余冷负荷由吸收式制冷机满足; 本文所提出 IES 基于“以电定热”的控制策略进行容量配置与运行优化设计。

1.2 设备模型

所提出系统中关键设备的数学模型如下所示。

1.2.1 HT-PEMFC

HT-PEMFC 以氢气和氧气作为燃料, 产生大量热能和电能的同时得到的产物只有水, 具有高效且清洁的特点。HT-PEMFC 的发电、产热数学模型^[23]如式 (1) 和 (2) 所示:

$$P_e(t) = [\eta_e Q_c(t)] / \eta_{H2E} \quad (1)$$

$$H_c(t) = [\eta_h Q_c(t)] / \eta_{H2E} \quad (2)$$

式中, $P_e(t)$ 和 $H_c(t)$ 分别为 t 时刻 HT-PEMFC 的发电和产热功率, $Q_c(t)$ 为 t 时刻 HT-PEMFC 的消耗 H_2 量 (Nm^3), η_{H2E} 为 HT-PEMFC 的氢/电转换系数, η_{ce} 和 η_{ch} 分别为 HT-PEMFC 的发电和产热效率。

1.2.2 光伏发电机组

光伏发电机组可将太阳能转换成电能供给系统使用,但发电量易受环境影响,尤其是太阳光照强度和温度对其影响较大。其数学模型^[24]如式(3)和(4)所示:

$$P_{PV}(t) = \{P_{Std}L(t)[1 + k(T_{PV}(t) - T_{Std})]\}/L_{Std} \quad (3)$$

$$T_{PV}(t) = T(t) + 30L(t) \quad (4)$$

式中, $P_{PV}(t)$, $T_{PV}(t)$, $L(t)$, $T_e(t)$ 分别为光伏发电机组的实时发电功率、工作温度、光照强度和环境温度, P_{Std} 为当温度 $T_{Std} = 25^\circ\text{C}$, 光照强度 $L_{Std} = 1 \text{ kW/m}^2$ 时光伏发电机组的发电峰值; k 为功率-温度关系系数。

1.2.3 风力发电机

风力发电机数学模型如式(5)所示:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & v \leq v_{in} \text{ or } v \geq v_{out} \\ \frac{(v^3 - v_{in}^3)P_r}{v_r^3 - v_{in}^3}, & v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_{out} \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_{WT} 为风力发电机的输出功率, P_r 为额定功率, v 为实际风速, v_r 为额定风速, v_{in} 为切入风速, v_{out} 为切出风速。

1.2.4 电解槽

电解水是目前结合 P2G 技术利用最广泛最成熟的制氢技术,利用电解槽将水电解产生 O_2 和 H_2 , 具有高效、低碳的特点。电解槽数学模型^[25]如式(6)所示:

$$Q_{ELC}(t) = \eta_{ELC} \eta_{E2H} P_{ELC}(t) \quad (6)$$

式中, $Q_{ELC}(t)$ 和 $P_{ELC}(t)$ 分别为 t 时刻的制氢量 (Nm^3) 和耗电量, η_{ELC} 和 η_{E2H} 分别为电解槽的工作效率和制氢系数。

1.2.5 储氢罐

储氢罐通过增加氢气密度实现高压储氢,储氢状态随着 t 时刻的储存或释放氢气的量而变化,其动态数学模型^[26]如式(7)所示:

$$E_{HSS}(t+1) = E_{HSS}(t) + [\eta_{HSS} Q_{HSS,s}(t) - Q_{HSS,r}(t)]/\eta_{HSS} \quad (7)$$

式中, $E_{HSS}(t+1)$, $E_{HSS}(t)$, $Q_{HSS,s}(t)$, $Q_{HSS,r}(t)$ 分别为 $t+1$ 时刻储存氢量, t 时刻的储氢量和存储、释放 H_2 体积 (Nm^3); η_{HSS} 为存储、释放 H_2 效率。

1.2.6 储热装置

储热装置的储热、放热动态数学模型可如式(8)所示:

$$E_{TSD}(t+1) = E_{TSD}(t) + [\eta_{TSD} Q_{TSD,s}(t) - Q_{TSD,r}(t)]/\eta_{TSD} \quad (8)$$

式中, $E_{TSD}(t+1)$, $E_{TSD}(t)$, $Q_{TSD,s}(t)$, $Q_{TSD,r}(t)$ 分别为 $t+1$ 时刻储热量, t 时刻的储热量和充、放热量; η_{TSD} 为充、放热效率。

1.2.7 电制冷机

电制冷机数学模型如式(9)所示:

$$C_{cc}(t) = c_{cc} P_{cc}(t) \quad (9)$$

式中, $P_{cc}(t)$, $P_{cc}(t)$, c_{cc} 分别为电制冷机在 t 时刻的制冷功率、输入功率及能效比。

1.2.8 吸收式制冷机

吸收式制冷机可通过热能驱动,经过二元溶液工质的

循环工作产生冷能。其数学模型如式(10)所示:

$$C_{ac}(t) = \eta_{ac} H_{ac}(t) \quad (10)$$

式中, $C_{ac}(t)$ 和 $H_{ac}(t)$ 分别为 t 时刻制冷量与输入热功率; η_{ac} 为工作效率。

1.2.9 燃气锅炉

为充分利用乡村丰富的生物质能,采用以沼气作为燃料的燃气锅炉为系统进行辅助供热。燃气锅炉的数学模型可如式(11)所示:

$$H_b(t) = \eta_b P_{bb}(t) \quad (11)$$

式中, $H_b(t)$, $P_{bb}(t)$ 分别为 t 时刻的产热功率以及其天然气输入量; η_b 为工作效率。

1.2.10 燃气发电机

燃气发电机是一种利用燃气(如天然气、沼气、甲烷气等)进行燃烧,并将热能转换为电能的发电设备。相比于其他传统的燃料,燃气发电机具有效率高、污染低、响应快等优点。其发电与产热数学模型可如式(12)和式(13)所示:

$$P_{RPG}(t) = \eta_{RPG} Q_{RPG}(t) \quad (12)$$

$$H_{RPG}(t) = \eta_{RPGH} Q_{RPG}(t) \quad (13)$$

式中, $P_{RPG}(t)$ 和 $H_{RPG}(t)$ 分别为 t 时刻燃气发电机的发电和发热功率, $Q_{RPG}(t)$ 为 t 时刻天然气输入量, η_{RPG} 和 η_{RPGH} 分别为发电、产热效率。

1.3 系统能流分析

本文所设计的 IES 包含 4 种能量流平衡关系,包括:电能平衡、热能平衡、冷能平衡以及由电解槽、HT-PEMFC 和储氢罐组成的氢储能系统的氢能平衡。本文所提出系统的能流平衡关系如图 2 和式(14)~(17)所示:



--- 电 --- 热 --- 冷 --- 气

图 2 IES 能流平衡关系图

1) 电能平衡:

$$P_{PV}(t) + P_{WTG}(t) + P_c(t) + P_{RPG}(t) = P_{ELC}(t) + P_{ec}(t) + P_{load}(t) \quad (14)$$

2) 热能平衡:

$$H_{RPG}(t) + H_c(t) + H_b(t) + \frac{Q_{TSD,r}(t)}{\eta_{TSD}} = H_{ac}(t) + \eta_{TSD} Q_{TSD,s}(t) + H_{heating}(t) \quad (15)$$

3) 冷能平衡:

$$C_{cc}(t) + C_{ac}(t) = C_{cooling}(t) \quad (16)$$

4) 氢能平衡:

$$Q_{ELC}(t) + Q_{HSS,r}(t)/\eta_{HSS} = \eta_{HSS}Q_{HSS,i}(t) + Q_c(t) \quad (17)$$

式中, $P_{load}(t)$, $H_{heating}(t)$, $C_{cooling}(t)$ 分别为用户在 t 时刻需要的电负荷、热负荷以及冷负荷。

2 IES 优化模型

2.1 优化方法

NSGA-II 是一种多目标优化算法, 具有非支配排序和拥挤度距离等优势方法, 能够同时优化多个目标和考虑多种约束条件。在 IES 优化中具有明显优势, 可以实现高效全局优化, 为能源系统的规划和设计提供支持。而 NSGA-II 算法遗传算子参数设置的需求也同时降低了其计算速度以及求解高纬度问题的全局搜索能力。

由鸟类觅食习性演化而来的粒子群算法 (PSO, particle swarm optimization) 依靠粒子位置和速度表征种群适应度和搜索能力的特点, 该特性使其获得了更简洁的参数设置需求以及更快的收敛速度, 此优势恰巧可以弥补 NSGA-II 算法的弊端。

本研究基于一种改进的混合遗传算法 C-NSGA-II^[26] 实现对系统容量配置与运行的优化, 以验证系统的优越性。该算法结合 PSO 算法的位置、速度更新方法, 将遗传算法的染色体种群作为位置更新方法的输入种群, 借助 PSO 算法全局最优与个体最优引导方法, 控制种群的变异方向与程度。混合算法的具体流程如下:

1) 初始化。对种群数量 S , 优化变量维度 D 、迭代次数 G_m 、优化模型系数、以及环境数据、负荷数据等参数进行初始化。并设置初始迭代数 gen 为 0, 根据初始设置范围生成初始种群 $P_0 = \{x_{i,j}, i = 1, 2, \dots, S, j = 1, 2, \dots, D\}$ 。

2) 非支配排序。基于个体的适应度进行计算, 利用快速非支配排序与拥挤度算子, 划分 pareto 解集并从中优先选择遗传个体。

3) 更新种群。保留 NSGA-II 的“交叉”全局搜索方法, 但将“变异”过程替换为 PSO 算法的位置更新方法。该过程可如式 (18) 所示:

$$\begin{cases} v(t+1) = s \cdot v(t) + c_1 rand_1 [p_1(t) - x(t)] + \\ c_2 rand_2 [g_1(t) - x(t)] \\ x(t+1) = v(t+1) + x(t) \end{cases} \quad (18)$$

式中, $x(t)$ 和 $v(t)$ 分别为个体在 t 时刻的位置与速度; s 为搜索能力系数; c_1 和 c_2 则均为学习因子。 $p_1(t)$ 和 $g_1(t)$ 分别为 t 时刻种群的个体最优和全局最优。

位置更新后子代的位置与速度如式 (19) 所示:

$$\begin{cases} x_{gen,i} = x_{gen-1,i} + v_{gen-1,i} \\ v_{gen,i} = \delta v_{gen-1,i} + c_1 rand_{1,i} [p_{1,gen-1,i}(t) - \\ x_{gen-1,i}(t)] + c_2 rand_{2,i} [g_{1,gen-1,i}(t) - x_{gen-1,i}(t)] \end{cases} \quad (19)$$

式中, $x_{gen,i}$ 为第 gen 次迭代中的第 i 个变量。

4) 精英保留。基于父代和子代种群其适应度、拥挤度算子以及非支配排序结果, 构建新的子代种群。

5) 循环迭代。结合父代和子代种群, 基于其适应度、拥挤度算子以及非支配排序结果, 选择更加符合优化指标结果的个体, 形成新的子代种群。

通过混合算法 C-NSGA-II 进行优化求解的流程如图 3 所示。

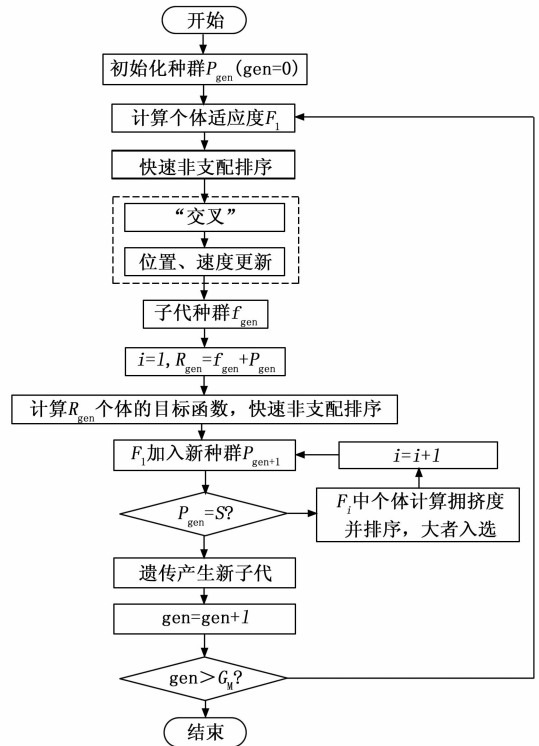


图 3 C-NSGA-II 优化流程图

2.2 容量配置

2.2.1 目标函数

1) CO₂ 减排率:

$$F_{CO_2ERR} = (CO_2E - CO_2E_{I\text{ESS}})/CO_2E \quad (20)$$

式中, $CO_2E_{I\text{ESS}}$ 为 IES 的 CO₂ 排放总量; CO_2E 为乡村传统系统的 CO₂ 排放量。

2) 成本节约率:

$$F_{COSR} = \left(\sum_{i=1}^T C - \sum_{i=1}^T C_{IES} \right) / \sum_{i=1}^T C \quad (21)$$

式中, C 为传统供能系统的成本, C_{IES} 为 IES 的成本。

2.2.2 约束条件

容量配置优化模型对本文所提出的新型 IES 中风力发电机、光伏发电机组、储热罐、储热装置的设备容量以及系统的电制冷比系数进行配置优化。由于系统中各设备在实际中会受到环境、负荷等因素的影响, 因此需要在优化过程中对其进行约束:

$$0 < V_{WTG} < V_{WTG,max} \quad (22)$$

$$0 < V_{PV} < V_{PV,max} \quad (23)$$

$$0 < V_{HSS} < V_{HSS,max} \quad (24)$$

$$0 < V_{TSD} < V_{TSD,max} \quad (25)$$

$$0.6 < R_{ratio} < 0.8 \quad (26)$$

式中, $V_{WTG}, V_{WTG,max}, V_{PV}, V_{PV,max}, V_{HSS}, V_{HSS,max}, V_{TSD}, V_{TSD,max}, V_{EPG}, V_{EPG,max}$ 分别为风力发电机、光伏发电机组、储氢罐、储热装置和燃气发电机的配置容量以及容量上限; R_{ratio} 为电制冷比。

2.3 运行优化

2.3.1 目标函数

1) 日均成本节约率:

$$max(F_{OCSR,day}) = \frac{(f_{r,SP,day} - f_{r,day})}{f_{r,SP,day}} \quad (27)$$

式中, $F_{OCSR,day}$ 为 IES 的典型日成本节约率; $f_{r,SP,day}$ 和 $f_{r,day}$ 分别为传统系统的典型日运行成本和新系统的典型日运行成本:

$$f_{r,day} = \frac{1}{N_{day}} (\sum_i^{N_{ev}} C_{i,var,day} + \sum_i^{N_{ev}} C_{ev,day}) \quad (28)$$

式中, $f_{r,day}$ 为系统典型日运行成本; $C_{i,var,day}$ 为各设备运行维护成本; $C_{ev,day}$ 为日购能成本;

2) CO₂ 减排率:

$$max(F_{CO_2EER,day}) = \frac{\sum_{t=1}^{24} f_{CO_2,T,day}(t) - \sum_{t=1}^{24} f_{CO_2,H_2,day}(t)}{\sum_{t=1}^{24} f_{CO_2,T,day}(t)} \quad (29)$$

式中, $F_{CO_2EER,day}$ 为 IES 的 CO₂ 减排率, $f_{CO_2,T,day}$ 和 $f_{CO_2,H_2,day}$ 分别为传统系统的 CO₂ 排放量和新系统的 CO₂ 排放量;

3) 效率目标函数: 为解决目前常用的节能指标“一次能源节约率”不能考虑到能量的品质变化的缺陷, 本文引入效率对系统的节能性能进行评价, 同时提出效率提升率作为节能目标函数进一步体现新系统的优势, 火用效率提升率如式 (30) 所示:

$$max(F_{EEIR}) = \sum_{t=1}^{24} E_{HT,day}(t) - \sum_{t=1}^{24} E_{SP,day}(t) \quad (30)$$

$$E_{HT,day}(t) = \frac{\sum E_{out,x,i}(t)\mu_i}{\sum E_{in,x,i}(t)\mu_i} \quad (31)$$

$$\sum E_{out,x,i}(t)\mu_i = \sum [P_{out,e}(t)\mu_e + P_{out,h}(t)\mu_h + P_{out,c}(t)\mu_c] \quad (32)$$

$$\sum E_{in,x,i}(t)\mu_i = \sum [P_{in,f}(t)\mu_f + P_{in,e}(t)\mu_e + P_{in,h}(t)\mu_h + P_{in,m}(t)\mu_m] \quad (33)$$

式中, $E_{SP,day}, E_{HT,day}$ 分别为传统系统 IES 的效率; $E_{x,in,i}, E_{x,out,i}$ 和 μ_i 分别为不同类型能源的输出、输入火用以及 EQC, 当 $i=e, h, c, f$ 或 rn 时, 分别为电能、热能、冷能、化石燃料、和可再生能源, 其中认为 $\mu_m=0$, 即使用可再生能源发电不产生污染也不消耗一次能源, 因此该设定使得优化过程中鼓励使用可再生能源。

2.3.2 约束条件

运行优化部分主要针对容量配置得到的风力发电机、光伏发电机组、储氢罐以及储热装置进行优化, 其设备出力情况受到配置容量约束。

$$0 < P_{WTG} < V_{WTG} \quad (34)$$

$$0 < P_{PV} < V_{PV} \quad (35)$$

$$0 < E_{HSS} < V_{HSS} \quad (36)$$

$$0 < E_{TSD} < V_{TSD} \quad (37)$$

3 算例数据

本研究以山东省某乡村为例对系统的优越性进行验证。使用 Sketch Up 建立的算例 3D 模型及其仿真负荷数据分别如图 4 和图 5 所示。

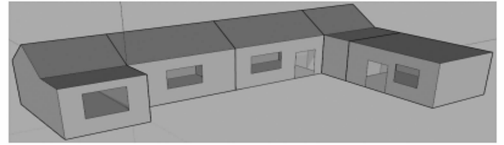


图 4 Sketch Up 3D 模型

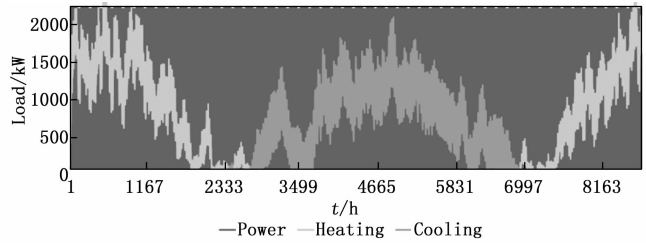


图 5 建筑负荷数据

对进行算例运行优化所选取的典型日环境数据以及负荷数据分别如图 6~9 所示。

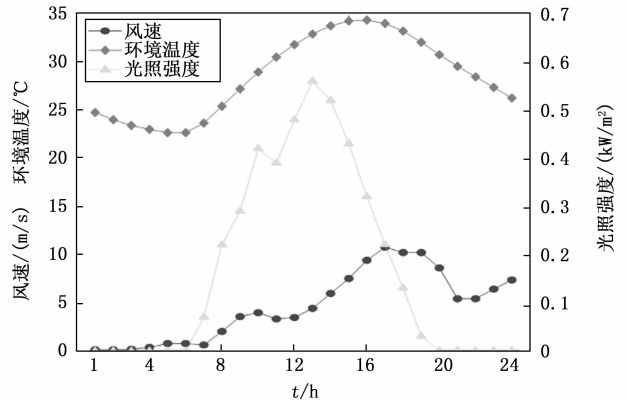


图 6 夏季典型日环境数据

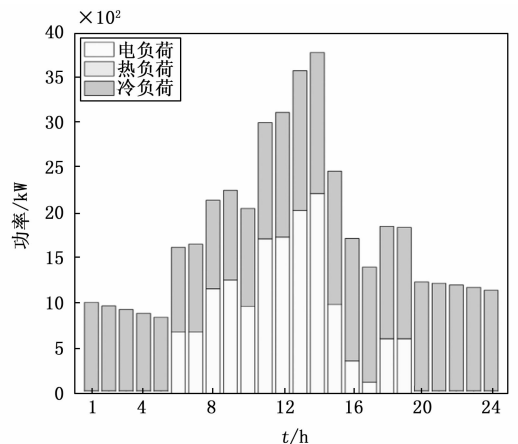


图 7 夏季典型日负荷数据

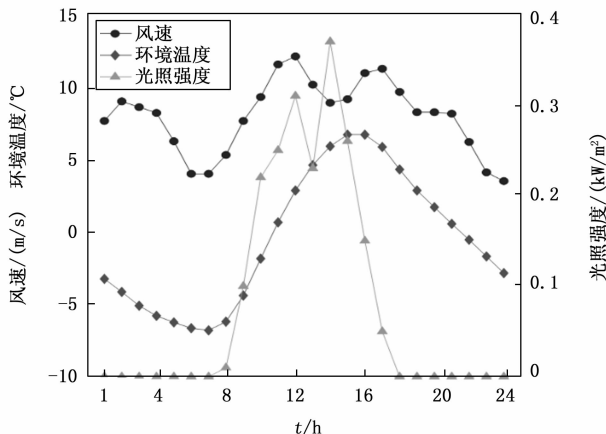


图 8 冬季典型日环境数据

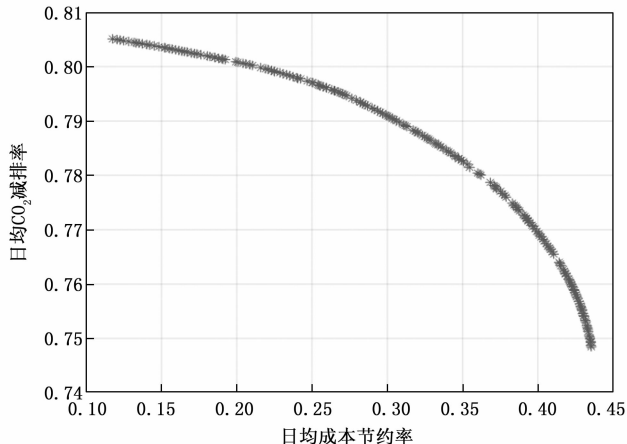


图 10 容量配置优化的 pareto 解集

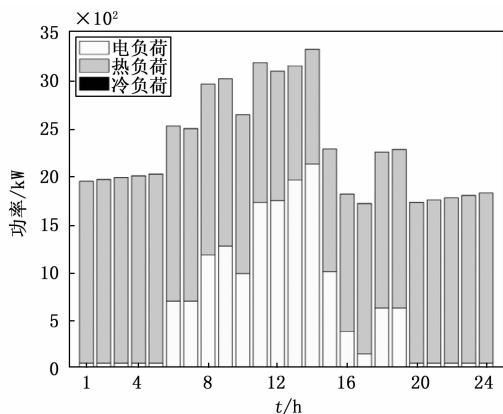


图 9 冬季典型日负荷数据

优化过程中所涉及的系统设备购置成本、运维成本、使用寿命等运行参数如表 1 所示。

表 1 系统关键设备参数

设备类型	购置成本 / (\$ / kW)	运维成本 / (\$ / kWh)	使用寿命 / 年
HT-PEMFC	360	0.043 6	20
光伏发电机组	1230	0.002 8	20
电解槽	857	0.02	20
储氢罐	1.18 (\$ / Nm³)	0.000 18 (\$ / Nm³) / h	10
储热装置	45.71	0.000 19	10
电制冷机	538.6	0.043 6	20
吸收式制冷机	107	0.02	20
燃气发电机	812	0.2	10
燃气锅炉	46	0.18	10

4 结果分析

针对算例数据进行负荷容量配置得到的 pareto 解集如图 10 所示。

系统的容量配置结果如表 2 所示。

表 2 容量配置优化结果

类型	符号	数值
功率 / kW	V_{WTG}	8 831
	V_{PV}	1 092
数量 / kW	V_{HSS}	1 100
	V_{TSD}	600
比值 / %	R_{atio}	60
目标函数 / %	$F_{CO,ERR}$	64.34
	F_{COSR}	78.38

由表 2 可知, 在满足乡村用户基本用能需求的前提下, 本研究所提出新型 IES 在经济性和环保性方面具有显著优势, 同时通过所提出的改进遗传算法进行容量配置优化可将其优势充分发挥。

系统的冬季典型日设备出力情况运行优化结果分别如图 13 和图 14 所示。

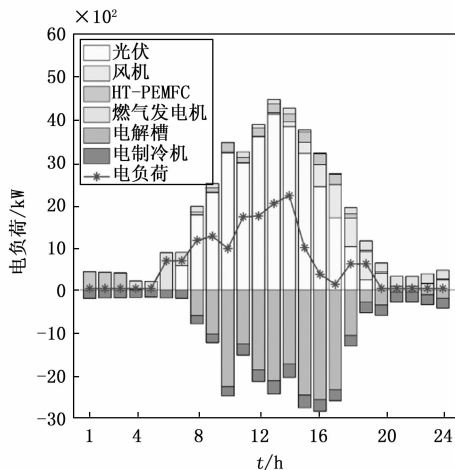


图 11 夏季典型日电负荷设备出力情况

由图 11 和图 12 可见, 夏季典型日在白天普遍具有较高水平的光照强度, 提供了可观的光伏发电量, 多余的发电量用于电解水制氢进而供给 HT-PEMFC 消耗提供了吸收式

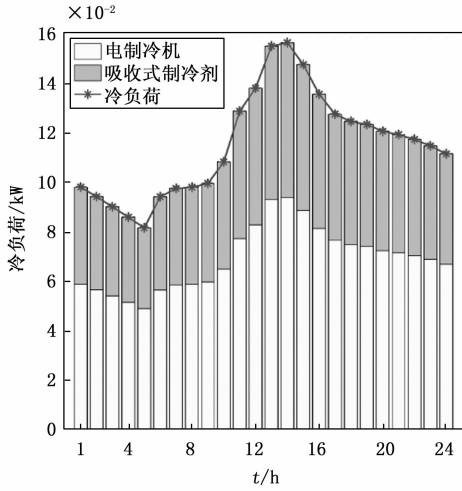


图 12 夏季典型日冷负荷设备出力情况

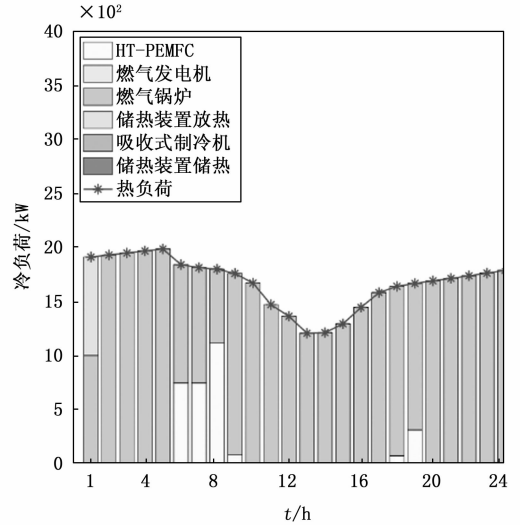


图 14 冬季典型日热负荷设备出力情况

制冷机需要的大部分热量。但也同时导致氢气的储备较少，因此在 4~7 时以及 20~24 时，光伏发电量不足时往往需要燃气发电机作为补充。

系统的夏季典型日设备出力情况运行优化结果分别由图 11 和图 12 所示。

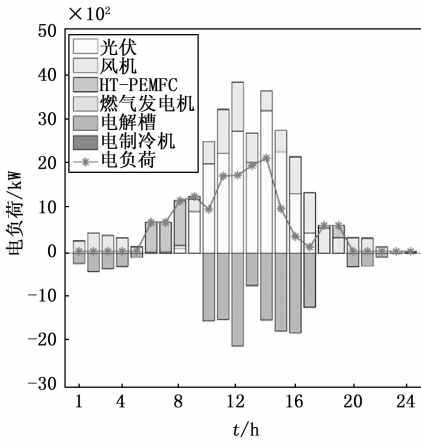


图 13 冬季典型日电负荷设备出力情况

由图 13 和图 14 可见，冬典型日光照强度比夏季典型日显著减少，但风力发电机可以产生相对较多的发电量，而大多数时候光伏发电量仍然可以满足用户的用电需求。冬季典型日的热负荷需求较大，因此需要燃气锅炉进行更多的补充供热，以应对系统发电量充足而产热不足的情况。

运行优化的目标函数结果如表 3 所示。

表 3 典型日运行优化的目标函数结果 %

目标	$F_{OC\text{CSR},\text{day}}$	$F_{CO_2\text{EER},\text{day}}$	F_{EER}
夏季典型日	41.75	91.03	97.24
冬季典型日	72.97	67.31	55.54

根据容量配置及运行优化结果可知，本文所提出的新型 IES 可以在满足乡村负荷刚需的前提下，显著降低成本 64.34%，同时减少 CO₂ 排放 78.38%。而系统的优越性在

夏季和冬季典型日表现得更为明显，夏季典型日由于光照条件更为优越，因此夏季可再生能源的利用达到更高的程度，提出系统在低碳性和节能性方面的优势也表现得更为突出，但由于新能源设备的运维成本更高，夏季典型日的成本节约率相对低一些。而冬季则因为传统购买天然气的供能方式更为成熟，因而凭借 IES 能量梯级利用的特点获得更大的成本节约率。

5 结束语

本文提出了一种基于可再生能源发电、电解水制氢技术和储氢与储热装置构建的新型乡村 IES，以及基于 C-NS-GA-II 多目标智能算法的容量配置与运行优化方法。实验结果表明，该系统在满足乡村负荷刚需的前提下，显著降低了成本和 CO₂ 排放。特别是在夏季和冬季典型日，系统表现出更为突出的低碳性和节能性能，并取得了较高的成本节约率。综合来看，该研究为兼顾高比例可再生能源乡村 IES 的风光消纳问题和能源品质问题提供了一种可行的解决方案，具有实际应用的潜力。未来的工作可以进一步优化系统的运行策略，提高系统的综合性能，并提高在其他地区的适用性和可扩展性。

参考文献:

- [1] 孙纪康, 毕莹玉, 董淑秋. “双碳”目标下城市综合能源规划的探索研究 [C] //中国城市规划学会. 人民城市, 规划赋能——2022 中国城市规划年会论文集 (03 城市工程规划), 2023: 9.
- [2] 张海华, 刘福才. 考虑风电消纳的区域综合能源系统优化运行分析 [J]. 太阳能学报, 2023, 44 (10): 585.
- [3] 刘子华, 曹瑞峰, 赵志扬, 等. 基于碳排放流的综合能源系统碳排放监测方法 [J]. 浙江电力, 2023, 42 (10): 65-72.
- [4] 胡福年, 张彭成, 周小博, 等. 计及灵活性资源的综合能源系统源荷协调优化调度 [J]. 中国电力, 2024, 57 (5): 2-13.
- [5] 秦 烁, 赵 健, 徐 剑, 等. 基于多任务学习和单任务学习

- 组合模型的综合能源系统多元负荷预测 [J]. 电网技术, 2024, 48 (4): 1510-1518.
- [6] 贾宏杰, 雷雨, 靳小龙, 等. 考虑绝热性能差异的建筑群与社区综合能源系统协同优化 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (24): 31-38.
- [7] 熊伟笑, 高辉, 陈璐, 等. 考虑负荷时序特性的居民柔性资源低碳协同方法 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (10): 188-193.
- [8] 赵楠, 王俊, 黄桦, 等. 计及氢电混合动力车响应的多区域综合能源系统协调优化调度 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43 (12): 257-264.
- [9] 孟明, 马思源, 赵慧婷, 等. 含光热电站和 CCS-P2G 耦合的综合能源系统双层优化运行策略 [J/OL]. 华北电力大学学报 (自然科学版): 1-10 [2023-11-02].
- [10] 许新华, 高刚, 徐永嘉. 基于改进遗传算法的综合能源优化调度方法 [J]. 电气开关, 2023, 61 (5): 35-38.
- [11] 高建伟, 张艺, 高芳杰, 等. 农业综合能源系统多场景置信间隙决策低碳调度 [J]. 电力建设, 2024, 45 (5): 105-117.
- [12] 李泽霜, 唐忠, 程卓, 等. 基于改进麻雀搜索算法的电-热-气-氢综合能源系统优化 [J/OL]. 现代电力: 1-11 [2023-11-02].
- [13] 张晓峰, 艾芊, 陈昱昱. 基于风-氢-甲醇-碳捕集一体化的综合能源系统经济运行建模分析 [J/OL]. 现代电力, 2024, 41 (4): 699-709.
- [14] 姜德威, 高红均, 贺帅佳, 等. 考虑生物质能和农业柔性负荷的农业产业园区综合能源系统规划方法 [J]. 电网技术, 2024, 48 (5): 1836-1845.
- [15] 孙璐瑶, 陈来军, 熊宇峰, 等. 考虑光热集热单元的氢储能热电联供综合能源系统容量优化配置 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43 (12): 70-76.
- [16] 刘文昕, 方家琨, 胡可崴, 等. 计及氢气-天然气混输的气电综合能源系统动态最优能流计算 [J]. 电工技术学报, 2023, 38 (s1): 1-17.
- [17] WANG Y L, CAI C C, LIU C, et al. Planning research on rural integrated energy system based on coupled utilization of bio-
(上接第 207 页)
- [14] TSCHANNEN M, KRAMER T. Heart sound classification using deep structured features [C] //2016 Computing in Cardiology Conference (CinC), 2016: 1-4.
- [15] LATIF S, MUHAMMAD U. Phonocardiographic sensing using deep learning for abnormal heartbeat detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18 (22): 9393-9400.
- [16] CHEN J F, DANG X. Heart sound analysis based on extended features and related factors [C] //2019IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), 2019: 1-6.
- [17] MANIK G K, CHAVAN. Removal of high frequency noise from ECG signal using digital IIR butterworth filter [C] // 2014 IEEE Global Conference on Wireless Computing & Networking (GCWCN), 2014: 1-4.
- [18] CRISTHIAN P, BRYAN S P. Ensemble of feature-based and mass-solar energy resources [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 53 (A): 102416.
- [18] WANG J J, CHEN H Y, CAO Y H, et al. An integrated optimization framework for regional energy planning with a sustainability assessment model [J]. Sustainable Production and Consumption, 2023, 36: 526-539.
- [19] LI S R, ZHANG L H, WANG X J, et al. A decision-making and planning optimization framework for multi-regional rural hybrid renewable energy system [J]. Energy Conversion and Management, 2022: 273.
- [20] LUO X, LIU Y F, FENG P G, et al. Optimization of a solar-based integrated energy system considering interaction between generation, network, and demand side [J]. Applied Energy, 2021: 294.
- [21] WANG J S, XUE K, GUO Y J, et al. Multi-objective capacity programming and operation optimization of an integrated energy system considering hydrogen energy storage for collective energy communities [J]. Energy Conversion and Management, 2022: 268.
- [22] HU X, ZHANG H, CHEN D W, et al. Multi-objective planning for integrated energy systems considering both exergy efficiency and economy [J]. Energy, 2020, 197: 1-18.
- [23] 张维. 风氢耦合系统的容量优化及配置方案研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2020.
- [24] KANG L, WU X, YUAN X, ET AL. Influence analysis of energy policies on comprehensive performance of CCHP system in different buildings [J]. Energy. 2021, 233.
- [25] MA R G, CHEN J, ZHAO J C. Multi-objective optimization of the capacity of non-grid-connected wind and hydrogen complementary systems [J]. Acta. Sol-Energy Sin., 2019: 422-429.
- [26] 钟鹏元, 杨晓宏, 寇建玉. 含储氢结构的园区综合能源系统优化配置研究 [J]. 综合智慧能源, 2022, 44 (9): 11-19.
- [27] 严毅. 含压缩空气储能的冷热电联供微网优化设计与运行控制研究 [D]. 济南: 山东大学, 2019.
- deep learning-based classifiers for detection of abnormal heart sounds [J]. Computing in Cardiology Conference (CINC), 2016, 43: 621-624.
- [19] 黄健钟. 心音周期特征和心音神经网络的构建方法研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [20] DAVIS S, MERMELSTEIN P. Comparison of parametric representations for monosyllabic word recognition in continuously spoken sentences [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1980, 28 (4): 357-366.
- [21] HUANG X D, ACERO A, HON H W. Spoken language processing: a guide to theory, algorithm, and system development [M]. Prentice Hall PTR, 2001: 4-50.
- [22] RAO D N, GUO H F, JIANG Z H. Stock index simulation based on parallel probabilistic planning (article) [J]. Chinese Journal of Computers, 2019, 42 (6): 1334-1350.